

## ПОВОРОТНИЙ ПНЕВМОГІДРАВЛІЧНИЙ ПРИВОД З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ

*Статья посвящена актуальной проблеме исследования и создания пневмогидравлических многопозиционных приводов с цифровым управлением. Рассмотрена модульная компоновка цифрового привода, которая дает возможность из одноступенчатых разрядных секций создавать многоразрядные пневматические и пневмогидравлические цифровые приводы с регулируемой величиной дискретности. Предложена математическая модель для расчета основных статических характеристик. Дан анализ зависимости крутящего момента от числа разрядов цифрового привода.*

*The article highlights actual problem of research and creation of hydropneumatic drive with digital control. There is considered modular configuration of digital drive from one-type functional electronic blocks, which gives an opportunity to create multiply charged pneumatic and hydropneumatic digital drives with controlled variable of resolution. Also there is proposed mathematical model for estimation of basic static characteristics. As a result there has been made analysis of torsion torque dependence from the number of digital drive orders.*

**Аналіз публікацій** Сучасне виробництво характеризується широким втіленням новітньої техніки, яка дає можливість значно розширити технологічні можливості обладнання, підвищити надійність, довговічність, функціональні можливості і точність обробки і позиціонування робочих органів. В останні роки широке застосування в автоматизації виробничих процесів знаходять багатопозиційні пневматичні, гідравлічні, електричні та пневмогідравлічні приводи, керування якими здійснюється у двійковому або унітарному кодах. Особливий розвиток отримали гідравлічні та пневматичні багатопозиційні приводи з цифровим керуванням. Дослідженню статички і динаміки таких приводів присвячено чимало робіт як в Україні, так і за рубіжем. Проблемі створення пневмогідравлічних приводів з направляючими та гальмуючими пристроями присвячені роботи [1, 2]. Аналізу динаміки пневматичних та пневмогідравлічних цифрових приводів присвячені роботи [3, 4]. Аналіз точності позиціонування з послідовним розміщенням поршнів у циліндрі цифрового і приводу з об'ємними гідравлічними дозаторами приведений в роботах [5, 6]. В роботі [7] розглянуті режими позиціонування пневматичних цифрових приводів, встановлено зв'язок між послідовністю відпрацювання керуючих сигналів із структурою приводу. Проблемі створення багатопозиційного пневмогідравлічного приводу з малою дискретністю і незначним осьовим габаритним розміром присвячені роботи [6, 8], в цих роботах розглянуті комбіновані цифрові приводи, в яких поєднані можливості багатопоршневих цифрових приводів з об'ємними цифровими приводами та електричними кроковими двигунами. Всі ці роботи присвячені створенню і дослідженню цифрових приводів поступального руху.

У запропонованій роботі розглянуто конструкцію поворотного пневмогідравлічного цифрового приводу.

Виклад основного матеріалу. На Рис. 1. показаний поворотний пневмогідравлічний цифровий привод (ППГЦП) [9].

Поворотний цифровий привод містить нерухомий вал 30, в якому виконані канали живлення 1, 13, 47. На валу 30 установлені розрядні секції 18, 21, і секція зворотного повороту 26. В розрядних секціях закріплені перегородки (перерізи Б-Б і В-В) 9, 10, 11, 12 і розміщені вали 3, 4, в яких закріплені пластини 5, 6, 7, 8 з каналами 14, 15, 31, 32. В секції зворотного повороту 26 закріплена перегородка 29 (переріз А-А) і розміщений вал 33, в якому закріплена пластина 22 з каналом 34. Нерухомий вал 30 фланцем 35 і штифтами 36, 37 з'єднаний з валом 33 секції 26. Кришки 37-41 з'єднані з секціями штифтами 42, а з валами 3 і 4 – штифтами 43. Між розрядними секціями встановлені упорні підшипники 44, 45 і 46. До каналу 1 через дроселі 49, 51 і зворотні клапани 50, 52 приєднаний гідравлічний акумулятор 48, до якого підведено тиск живлення  $p_{жс}$ .

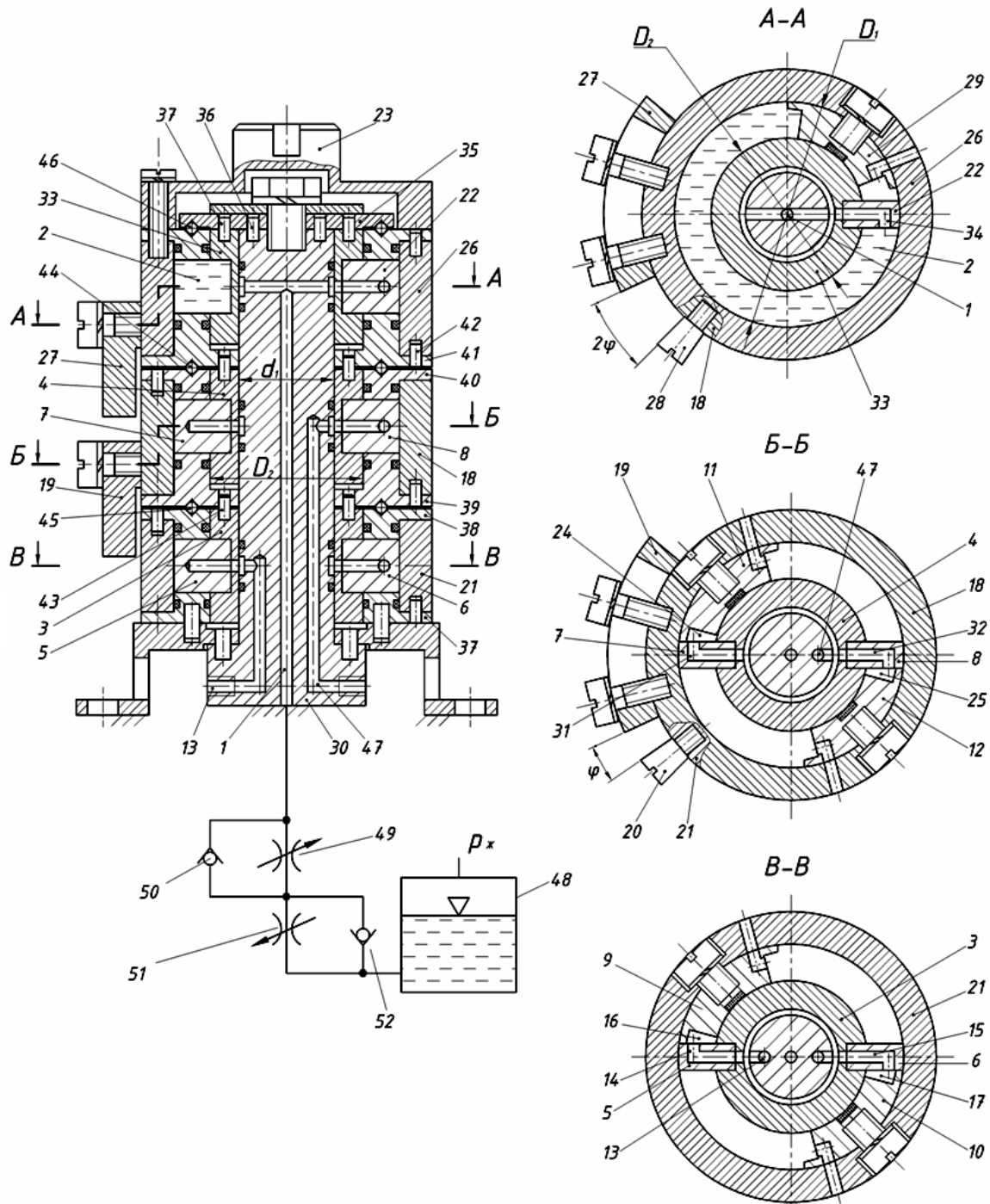


Рис. 1 Поворотний пневмогідравлічний цифровий привод

Принцип дії поворотного цифрового приводу полягає в наступному. У вихідному положенні тиск живлення по каналу 1 (переріз А-А) підведений постійно до порожнини 2. Під дією цього тиску вал 3 (переріз В-В) і вал 4 (переріз Б-Б) повернуті за годинниковою стрілкою і пластинами 5, 6 упираються відповідно в роздільники 9, 10 (перерізи Б-Б і В-В) і 11, 12. При подачі тиску в канал 13 (переріз В-В) він через канали 14 і 15 поступає відповідно в порожнини 16 і 17. Під дією цього тиску вал 3 (переріз В-В) з секцією 18 (переріз Б-Б) повертається проти годинникової стрілки на кут  $\varphi$  (переріз Б-Б). Величина кута  $\varphi$  визначається відносним розміщенням регульованого упора 19 закріпленого на секції 18 (переріз Б-Б) і

упором 20 закріпленим на секції 21 (переріз Б-Б). Внаслідок повороту вала 3 (переріз В-В) вихідний вал 23 теж повертається на кут  $\varphi$ . При подачі тиску живлення в камери 24 і 25 (переріз Б-Б) вал 4 (переріз Б-Б) повертає секцію 26 на кут  $2\varphi$  (переріз А-А) до постановки регульованого упора 27 на упор 28, закріпленого на секції 18 (переріз А-А). Внаслідок цього і вал 23 теж повертається на кут  $2\varphi$ . При одночасній подачі тиску живлення у камери 16, 17, 24, 25 вихідний вал 23 повертається на сумарний кут поворотів вала 3 і вала 4, тобто на кут  $3\varphi$ . При з'єднанні камер 16, 17 і 24, 25 з атмосферою (перерізи Б-Б і В-В) перегородка 29 під дією постійного тиску у камері 2 (переріз А-А) разом з секцією 26 повертається за годинниковою стрілкою і повертає вали 3 і 4 у вихідне положення до упора їх пластин у перегородки 9, 10 і 11, 12 (перерізи Б-Б і В-В). Швидкість повороту вихідного валу за годинниковою стрілкою і проти годинникової стрілки регулюється відповідно дроселем 49 і 51.

У запропонованому пристрої завдяки розміщенню в розрядних секціях двох пластин з утворенням двох робочих камер і установці між секціями упорних підшипників кочення суттєво збільшується ефективний крутний момент на вихідному валу. А розміщення регульованих упорів на зовнішніх поверхнях секцій дає можливість регулювати дискретність приводу.

Розрахунок основних статичних характеристик пневмогідролічного поворотного приводу.

Величини повороту розрядних секцій визначаються залежністю

$$\varphi_i = 2^{i-1} \cdot \varphi_0,$$

де  $i$  - порядковий номер розрядної секції,  $\varphi_0$  - кут повороту секції молодшого розряду (дискретність приводу).

Величина максимального кута повороту вихідного вала 23

$$\varphi_{\max} = \varphi_0 \cdot (2^n - 1),$$

де  $n$  - число розрядів (секцій) цифрового приводу.

Кількість позицій вихідного вала 23

$$N = 2^n$$

Величина повороту вихідного вала 23 відповідно до відпрацьованої комбінації керуючих сигналів

$$\varphi = \varphi_0 \sum_{i=1}^{i=n} b_i \cdot 2^{i-1},$$

де  $b_i$  - значуща цифра, що приймає значення «1» при подачі тиску в  $i$ -ту камеру і «0» при з'єднанні її з атмосферою.

Ефективний крутний момент на валу 23

$$M_e = M_T - M_3 - M_{y1} - M_{y2} - M_{y3} - M_{nl.} - M_n \pm M_{in.} \pm M_n$$

де  $M_T$  - теоретичний крутний момент;  $M_3$  - зворотній момент, який виникає за рахунок постійного тиску в порожнині 2;  $M_{y1}$  - момент сил тертя ущільнень вала 30;  $M_{y2}$  - момент сил тертя ущільнень валів 3, 4 і 33;  $M_{y3}$  - момент сил тертя ущільнень перегородок 9, 10 і 29;  $M_{nl.}$  - момент сил тертя пластин секцій;  $M_n$  - момент сил тертя підшипників кочення;  $M_{in.}$  - момент сил інерції;  $M_n$  - крутний момент від зовнішнього навантаження на вихідний вал 23.

Для спрощення задачі визначення ефективного крутного моменту поворотного цифрового приводу приймаємо, що  $M_{nl.} = 0$ ;  $M_n = 0$ ;  $M_{in.} = 0$  і  $M_n = 0$ .

Внаслідок прийнятих припущень ефективний крутний момент буде визначатися залежністю:

$$M_e = M_T - M_3 - \sum_{i=1}^{i=n} M_{y1} - M_{y2} - M_{y3}; \quad (1)$$

Величини крутних моментів  $M_T$ ,  $M_3$ ,  $\sum_{i=1}^{i=n} M_{y1}$ ,  $M_{y2}$  і  $M_{y3}$  визначаються наступними залежностями:

$$M_T = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} , \quad (2)$$

де  $D_1$  і  $D_2$  - діаметри секцій повороту;  $h_{nl}$  - висота пластини секції повороту;  $p_{ж}$  - тиск живлення;

$$M_3 = \frac{D_1^2 - D_2^2}{8} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} ; \quad (3)$$

$$M_{y1} = \pi \cdot d_1 \cdot b_{y1} \cdot \frac{d_1^2}{2} \cdot P_{K1} \cdot (n+1-i) \cdot f_{тер} , \quad (4)$$

де  $d_1$  - діаметр нерухомого вала 30;  $b_{y1}$  - ширина ущільнення нерухомого вала 30;  $n$  - число секцій (розрядів) привода;  $i$  - порядковий номер секції;  $P_{K1}$  - контактний тиск ущільнення нерухомого вала;  $f_{тер}$  - коефіцієнт тертя;

$$M_{y2} = 2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{y2} \cdot \frac{D_2}{2} \cdot p_K = \pi \cdot D_2^2 \cdot b_{y2} \cdot P_{K2} \cdot f_{тер} \quad (5)$$

де  $D_2$  - діаметр ротора секції повороту;  $b_{y2}$  - ширина ущільнення ротора секції повороту;  $P_{K2}$  - контактний тиск ущільнення секції повороту.

$$M_{y3} = 3 \cdot h_n \cdot b_{y3} \cdot \frac{D_2}{2} \cdot P_{K3} \cdot f_{тер} , \quad (6)$$

де  $h_n$  - висота перегородки секції;  $b_{y3}$  - ширина ущільнення перегородки;  $P_{K3}$  - контактний тиск ущільнення перегородки.

Підставимо значення крутних моментів із формул (2) – (6) в формулу (1) отримаємо залежність визначення ефективного крутного моменту на вихідному валу 23 поворотного цифрового привода.

$$M_e = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} - \frac{D_1^2 - D_2^2}{8} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} - \pi \cdot d_1 \cdot b_{y1} \cdot \frac{d_1^2}{2} \cdot P_{K1} \cdot (n+1-i) \cdot f_{тер} - \pi \times \\ \times D_2^2 \cdot b_{y2} \cdot P_{K2} \cdot f_{тер} - 3h_n \cdot b_{y3} \cdot \frac{D_2}{2} \cdot P_{K3} \cdot f_{тер} ; \quad (7)$$

Прийнявши допущення, що  $b_{y2} = b_{y3}$ , і  $h_{nl} = h_n$  і зробивши перетворення залежності (7) отримаємо спрощену формулу для визначення крутного моменту

$$M_e = \frac{D_1^2 - D_2^2}{8} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} - \pi \cdot \frac{d_1^2}{2} \cdot P_{K1} \cdot b_{y1} (n+1-i) \cdot f_{тер} - D_2 \cdot b_{y2} \cdot P_{K2} \cdot f_{тер} \times \\ \times (\pi \cdot D_2 + 1,5 \cdot h_{nl}) ; \quad (8)$$

Із аналізу залежності (8) випливає, що величина ефективного (дійсного) крутного моменту на вихідному валу залежить як від його основних параметрів  $D_1, D_2, h_{nl}, p_{ж}$ , так і від сил тертя ущільнень і числа розрядів  $n$  привода. Найменше значення крутного моменту буде в тому випадку, коли тиск живлення подається в порожнину молодшого розряду, тобто при  $i=1$ . Найбільше значення крутний момент буде мати при  $i=n$ , тобто коли тиск живлення подається в робочу порожнину старшого розряду. Для зменшення сил тертя в приводі доцільно застосовувати фторопластові ущільнення, коефіцієнт тертя яких на порядок менший за коефіцієнт тертя гумових ущільнень. Крім того коефіцієнт тертя фторопластових ущільнень практично не залежить від часу вистою в нерухомому положенні [10].

Максимальна кількість розрядів поворотного цифрового привода визначається із залежності (8) при  $i=1$ .

$$n_{\max} = \frac{\frac{D_1^2 - D_2^2}{8} \cdot h_{nl} \cdot p_{ж} - D_2 \cdot b_{y2} \cdot P_{K2} \cdot f_{тер} (\pi \cdot D_2 + 1,5 \cdot h_{nl}) - M_e}{\pi \frac{d_1^2}{2} \cdot P_{K1} \cdot b_{y1} \cdot f_{тер}} ; \quad (9)$$

Якщо в процесі розрахунку виявиться, що максимальна кількість розрядів  $n_{\max}$  менша заданої кількості розрядів  $n$  (тобто  $n_{\max} < n$ ), необхідно збільшити тиск живлення  $p_{ж}$ . При обмеженому значенні тиску живлення  $p_{ж}$  змінними парметрами є діаметр  $D_1$  і висота пластини  $h_{nl}$ .

Теоретична швидкість повороту вихідного вала пневмогідравлічного цифрового приводу як при прямому, так і при зворотному русі регулюється відповідно гідравлічними дроселями 51 і 52 [10].

$$\omega_T = \frac{2 \cdot Q_{op}}{(R_1^2 - R_2^2) \cdot h_{nl.}} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot f_d \cdot \sqrt{\Delta p}}{(R_1^2 - R_2^2) \cdot h_{nl.}}, \quad (10)$$

де  $f_d$  - ефективна площа перерізу дроселя в  $\text{мм}^2$ ;  $\Delta p$  - перепад тиску на дроселі в МПА;  $Q_{op}$  - витрати дроселя в  $\text{л/хв}$ ;  $R_1 = \frac{D_1}{2}$ ,  $R_2 = \frac{D_2}{2}$ ,  $h_{nl.}$  - висота пластини.

Дійсна швидкість повороту вихідного вала визначається за формулою

$$\omega_d = \frac{2(Q_{op} - Q_{втр})}{(R_1^2 - R_2^2) h_{nl.}}, \quad (11)$$

де  $Q_{втр}$  - втрати рідини із робочої порожнини зворотного повороту в атмосферу.

Із-за складності ущільнення торцевих поверхонь пластин у поворотних приводах можуть виникати значні втрати рідини, що призводить до зменшення швидкості повороту вихідного вала. Особливо це має велике значення при малих значеннях швидкостей повороту, коли кількість рідини, що поступає в робочу порожнину через дросель приблизно дорівнює втратам її через щілини. При цьому порушується стабільність руху вихідного вала і може призвести до його зупинки. При значних швидкостях повороту вихідного вала втрати рідини менше впливають на динаміку повороту.

**Висновки.** В статті розглянуто поворотний пневмогідравлічний цифровий привод модульної конструкції. Конструкція такого приводу складається із розрядних секцій, секції зворотного повороту вихідного вала і нерухомого вала з канавками живлення. Для компоновки цифрового приводу тієї чи іншої розрядності необхідно змінювати тільки конструктивні параметри нерухомого вала – довжину і кількість живлячих каналів.

Приведені аналітичні залежності, які в процесі проектування таких приводів дають можливість розраховувати параметри, виходячи із заданої дискретності і ефективного крутного моменту.

### Список літератури

1. М.А. Новік. Динаміка пневматичного цифрового приводу з гідравлічним гальмуючим пристроєм. //Технологія і техніка друкарства. – 2006 – Вип. 4(14) – с.81-87.
2. Новік М.А. Пневмогідравлічний цифровий привод з направляючими та гальмувальними пристроями. //Вестник національного технічного університету «ХПІ». – 2001. – Вип. 129. – с.241-249.
3. Новік М.А. Алгоритм визначення часу руху поршнів нез'єднаних із вихідним штоком пневмогідравлічного цифрового приводу. // Промислова гідравліка та пневматика. – 2007. - №3(17). – с.43-46.
4. М.А. Новік. Алгоритм визначення динамічних характеристик цифрового приводу. // Вестник національного технічного університету України «ХПІ». Машиностроение. – 2000. – с.115-127.
5. Новік М.А. Аналіз точності позиціонування цифрових приводів. // Вестник національного технічного університету України «ХПІ». Машиностроение. – 2007. - №54. с 124-130.
6. М.А. Новік. Комбінований цифровий привод з об'ємними дозаторами. // Промислова гідравліка і пневматика. 2007. - №2(16) – с.79-81.
7. М.А. Новік. Режими позиціонування пневматичних цифрових приводів. // Вестник національного технічного університету України «ХПІ». Машиностроение. – К.: НТУУ «ХПІ». – 2006. - №49. – с.125-130
8. Патент України №27812, МПК (2006) F15B7/00. Багатопозиційний пневмогідравлічний привод / Новік М.А. – опубл. 12.11.2007; Бюл. №5.
9. Патент України №34408, МПК (2006) F15B7/00. Поворотний цифровий привод / Новік. М. А., Кучерук Ю.М. – опубл. 11.08.2008; Бюл. №15.
10. Е.И. Абрамов, К.А. Колисниченко, В.Т. Маслов. Элементы гироспривода (Справочник). Изд. 2-е перераб. и доп. Киев, «Техника», 1977. – 320с.